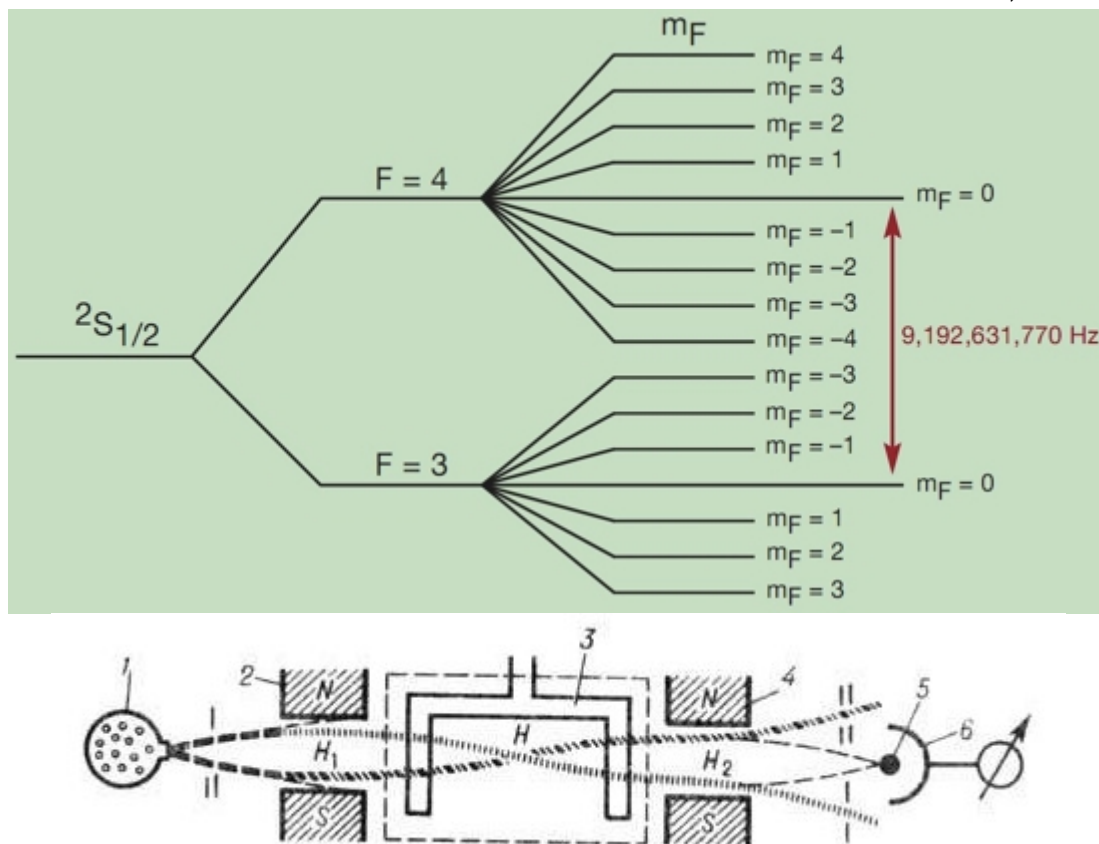


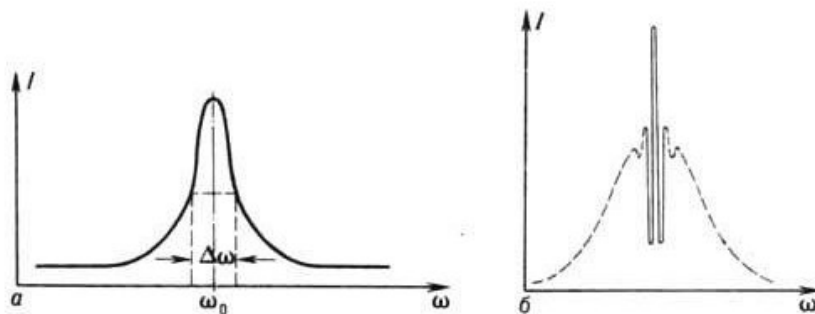
Эталоны частоты и длины (продолжение).

С 1967 года принят цезиевый стандарт частоты (и времени) на магнитных подуровнях цезия Cs^{133} : $\nu_0 = 9\,192\,631\,770 \text{ Гц}$. Воспроизводимость $\frac{\delta\nu}{\nu} < 10^{-11}$.



Первое неоднородное магнитное поле пролетают только атомы на подуровнях $m_F = 0$. На остальных подуровнях атомы слишком сильно отклоняются от первоначальной траектории и попадают на полюса магнита. Атомы на подуровнях $m_F = 0$ тоже отклоняются в неоднородном поле, только мало. На нижнем уровне $F=3$ атомы летят по траектории I, а на верхнем уровне $F=4$ атомы летят по траектории II. На приемник попадают только те атомы, которые в первом магнитном поле были на одном уровне, а во втором — на другом, то есть атомы, которые испытали переход в СВЧ поле.

Форма СВЧ резонатора похожа на букву Π , поэтому пучок атомов Cs пролетает через область СВЧ поля два раза. Если атом пролетает СВЧ область один раз, то форма спектральной линии имеет вид, как на рисунке слева,



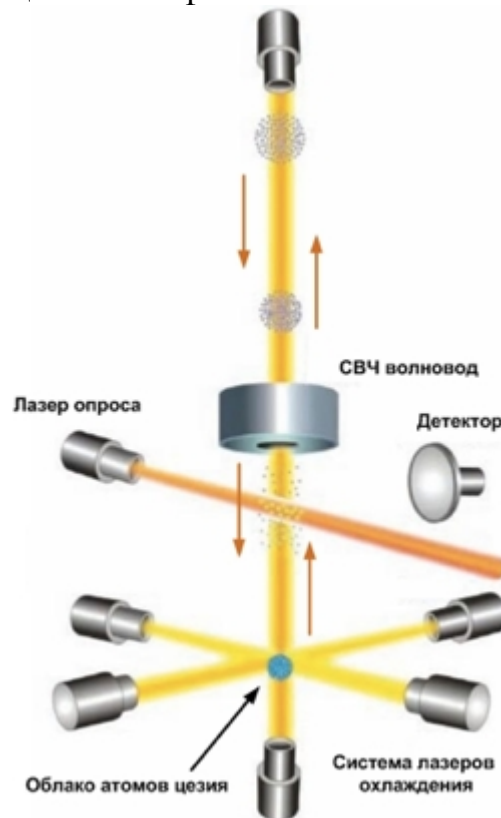
Форма спектральной линии: а-неискажённой; б-наблюдаемой в случае Π -образного резонатора.

где спектральная ширина $\Delta\omega = \frac{1}{\tau_1}$ определяется временем пролета резонатора τ_1 . В случае П-образного резонатора на этот спектральный контур накладывается особенность $\delta\omega = \frac{1}{\tau_{12}}$, связанная со временем пролета τ_{12} между двумя частями П-образного резонатора. В результате форма спектральной линии становится такой, как изображено на рисунке справа.

С 1983 года эталоны частоты и длины совмещены. В качестве скорости света в пустоте принято неподлежащее уточнению значение: $c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

При этом в оптическом диапазоне частотный репер получается с помощью радиооптического частотного моста. В оптическом диапазоне репером частоты служила частота генерации гелий-неонового лазера стабилизированного по резонансу насыщения поглощения в ячейке с метаном: He-Ne / CH₄. Длина волны генерации примерно $\lambda \approx 3.39 \text{ мкм}$. Частота: $\nu = 88\,376\,181\,603\,000 \text{ Гц}$.

В настоящее время эталоном частоты служит цезиевый эталон частоты на основе так называемого цезиевого фонтана.



Принципиальная схема фонтанных часов, разработанных в Национальной лаборатории стандартов США. Шесть инфракрасных лазеров охлаждают небольшое цезиевое облако до миллионных долей Кельвина. Лазеры выключают примерно на секунду, но нижний лазер отключают чуть позже других лазеров. В результате облако атомов цезия подбрасывают вверх и направляют его к микроволновой камере. Облако пролетает камеру дважды. Если частота электромагнитных колебаний в камере становится резонансной,

то максимальное число атомов цезия в облаке переходят в возбужденное состояние. Излучение лазера опроса поглощается только из возбужденного состояния атома. В случае максимального поглощения света лазера опроса и флуоресценция вбок облака при выходе из камеры будет максимальной. Точность таких часов оценивается в 1 секунду на 20 млн лет. Иллюстрация: NIST

Подробнее смотрите нобелевскую лекцию по физике 2005 года:

Дж.Л.Холл. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических частот - и не только. // УФН, 2006, Т.176, N12, С.1353-1367.

Там же смотрите вопросы, связанные с режимом синхронизации лазерных мод, световой пулей, спектром оптической гребенки фемтосекундных стабилизированных лазеров на кристалле титаната сапфира. Лазер активно стабилизируется в режиме целочисленного отношения несущей частоты и частоты следования импульсов.

Подробнее о цезиевом фонтане смотрите работу:

<http://www.quantum-electron.ru/pdfrus/fullt/2004/12/2749.pdf>

Стабильность и воспроизводимость частоты генерации лазера.

И стабильность, и воспроизводимость частоты генерации — это величины вида $\frac{\delta\nu}{\nu}$.

В случае определения стабильности частоты величина $\delta\nu$ — это так называемая вариация Аллана. Она вычисляется следующим образом. Пусть ν_1 — среднее значение частоты генерации лазера за некоторый промежуток времени τ , а ν_2 — среднее значение частоты генерации за соседний промежуток времени той же самой длительности τ . Тогда

$$\delta\nu \equiv \sqrt{\frac{\langle (\nu_1 - \nu_2)^2 \rangle}{2}}.$$

Для определения воспроизводимости частоты генерации лазера $\delta\nu$ не связана с приведенной выше формулой. В этом случае $\delta\nu$ — это среднеквадратичная разность частот двух стабилизированных лазеров, максимально одинаково изготовленных в разное время и в разных местах.

Лучшие параметры стабильности и воспроизводимости частоты генерации достигнуты на 2003 год на основе He-Ne лазера с ячейкой CH₄ ($\lambda \approx 3.39$ мкм) и Nd:YAG (лазер на алюмо-иттриевом гранате Y₃Al₅O₁₂ с добавками неодима Nd³⁺ и удвоением частоты на нелинейном кристалле) с ячейкой ¹²⁷I₂ ($\lambda \approx 532$ нм). Воспроизводимость около $2 \cdot 10^{-13}$, стабильность $5 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения $\tau \approx 10$ –100 с. Подробнее смотрите в обзоре:

Е. В. Бакланов, П. В. Покасов. Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры. // Квантовая электроника. 2003. Т.33. N.5. С.383-400.

Активная стабилизация частоты генерации лазера.

Частота генерации лазера связана с длиной волны его излучения соотношением $\lambda \nu = \frac{c}{n}$. Длина волны излучения определяется тем, что на длине

резонатора L укладывается целое число полуволн $L = m \frac{\lambda}{2}$. Таким образом, шумы длины резонатора превращаются в шумы частоты его генерации.

Медленные шумы или дрейфы длины резонатора возникают в результате температурных изменений из-за теплового расширения тел. Быстрые шумы могут быть связаны с акустическими колебаниями зеркал резонатора. Кроме того, электрические шумы системы накачки или создания инверсии заселенностей создают шумы оптической длины резонатора и на низких и на высоких частотах.

Устранение этих и других типов шумов частоты генерации лазера важно для любых точных измерений с использованием лазера.

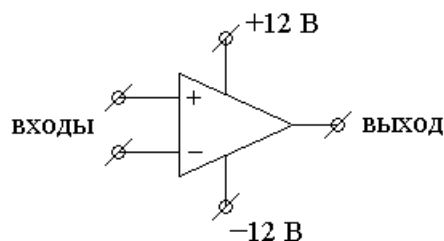
Активная стабилизация частоты генерации лазера позволяет значительно уменьшить шумы частоты.

Операционный усилитель (ОУ).

Активная стабилизация любого параметра системы имеет много общих моментов. Стабилизация достигается путем введения отрицательной обратной связи, которая при случайном шумовом изменении параметра посылает на вход системы сигнал, частично компенсирующий шумовое изменение.

Рассмотрим основные принципы активной стабилизации на примере работы операционного усилителя. Операционный усилитель обычно работает с отрицательной обратной связью.

Операционный усилитель — это микросхема с двумя входами и одним выходом, если не считать контактов, по которым подводится электрическое питание усилителя.



Хороший и дешевый (дежурный) операционный усилитель TL071, две штуки за один доллар.

Напряжение на выходе операционного усилителя равно усиленной примерно в миллионы раз разности напряжений на его входах:

$$U_{вых} = \alpha (U_+ - U_-), \text{ где } \alpha \approx 10^6 \gg 1 \text{ — коэффициент усиления.}$$

Анализ основных принципов работы ОУ с отрицательной обратной связью.

Анализ работы любой схемы с операционным усилителем возможен на основе двух соображений.

1). Напряжения на двух входах ОУ практически равны друг другу:

$$U_- = U_+,$$

так как если входные напряжения заметно неравны, то в миллион раз усиленная их разность окажется за пределами динамического диапазона выходного напряжения ОУ. Динамический диапазон ограничен двумя напряжениями питания ОУ.

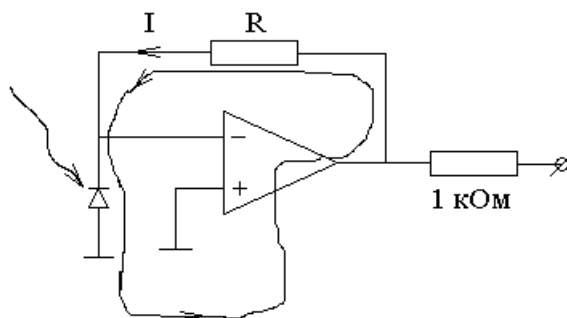
2). Входные токи ОУ пренебрежимо малы:

$$I_{вх-} = I_{вх+} = 0.$$

ОУ разрабатываются так, чтобы минимизировать входные токи. Тем не менее, входной ток ОУ отличен от нуля даже при нулевом напряжении на входе, поэтому каждый вход ОУ обязательно должен быть связан с общим проводом схемы хотя бы через большое сопротивление.

Преобразователь фототок — напряжение на основе ОУ.

Проанализируем работу типовой схемы включения фотодиода:



Под действием света в фотодиоде возникает фототок пропорциональный мощности света. Этот ток не может протекать через "–" вход операционного усилителя. Следовательно, весь фототок протекает через резистор обратной связи сопротивлением R . Типовое значение сопротивления $R = 1\text{ МОм}$.

Плюс-вход ОУ соединен с общим проводом схемы, поэтому $U_+ = 0$. Из условия $U_- = U_+$ следует, что и на минус-входе ОУ напряжение тоже близко к нулю $U_- = 0$.

В таком случае напряжение на фотодиоде близко к нулю. То есть фотодиод работает в так называемом режиме короткого замыкания. В этом режиме фотодиод обладает высокой линейностью преобразования мощности света в фототок и малыми шумами.

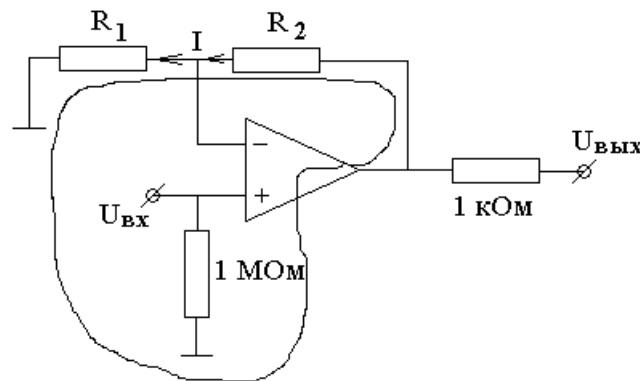
На левом краю резистора с сопротивлением R нулевое напряжение $U_- = 0$ относительно общего провода схемы. В таком случае на правом краю этого резистора напряжение равно RI , так как через резистор протекает фототок I .

Напряжение на правом краю резистора R совпадает с напряжением на выходе ОУ и практически совпадает с напряжением на выходе схемы. Резистор сопротивлением 1 кОм включен между выходом ОУ и выходом всей схемы для подавления возбуждения генерации в петле обратной связи ОУ. Дело в том, что

к выходу ОУ обычно нельзя подключать емкость больше $20\text{нФ} = 20 \cdot 10^{-12} \text{Фарад}$. Иначе поворот фазы на RC -цепочке, где R — выходное сопротивление ОУ, может сделать на высоких частотах отрицательную обратную связь положительной. Включение в схему резистора 1кОм позволяет подключать к выходу схемы коаксиальный кабель осциллографа без нарушения работы схемы. Емкость коаксиального кабеля имеет величину порядка 100пф .

Усилитель напряжения на ОУ.

Проанализируем работу простейшего усилителя напряжения на ОУ:



Плюс-вход ОУ соединен с общим проводом схемы через большое сопротивление 1МОм , чтобы входные токи плюс-входа гарантированно могли достигнуть общего провода схемы.

Напряжение на входе схемы равно напряжению на плюс-входе ОУ $U_+ = U_{вх}$. С учетом равенства $U_- = U_+$ получаем $U_- = U_{вх}$.

Напряжение минус-входа ОУ приложено к резистору сопротивлением R_1 . Тогда сила тока через этот резистор

$$I = \frac{U_-}{R_1} = \frac{U_{вх}}{R_1}.$$

Ток минус входа ОУ пренебрежимо мал. Тогда весь ток $I = \frac{U_{вх}}{R_1}$

протекает через резистор сопротивлением R_2 . При этом падение напряжения на обоих резисторах равно напряжению на выходе ОУ:

$$U_{вых} = (R_1 + R_2)I = (R_1 + R_2) \frac{U_{вх}}{R_1} \Rightarrow$$

$$U_{вых} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{вх}.$$

Отношение напряжений на выходе и на входе схемы по определению равно коэффициенту передачи схемы по напряжению:

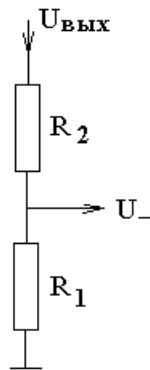
$$K_U \equiv \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Основные параметры системы стабилизации на примере стабилизации напряжения U_- на уровне напряжения U_+ в схеме усилителя напряжения на ОУ.

ОУ многократно усиливает разность напряжений на плюс и минус входах:

$U_{вых} = \alpha(U_+ - U_-)$, где $\alpha \approx 10^6$ — коэффициент передачи ОУ со входа на выход.

Часть напряжения с выхода ОУ с делителя напряжения, собранного на сопротивлениях R_2 и R_1 , поступает на минус-вход ОУ в качестве сигнала отрицательной обратной связи:



С выхода на минус-вход поступает часть напряжения $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$. Тогда

$U_- = \beta U_{вых}$. Величину β называют коэффициентом передачи с выхода на минус-вход.

Произведение коэффициентов передачи со входа на выход и с выхода на минус-вход называют коэффициентом передачи петли обратной связи:

$$K_0 \equiv \alpha\beta,$$

где индекс 0 — это намек на петлю.

Величину $U_+ - U_-$ называют сигналом ошибки. Это величина, которую система стабилизации стремится уменьшить до нуля.

Подставим в формулу $U_- = \beta U_{вых}$ выражение $U_{вых} = \alpha(U_+ - U_-)$ и получим:

$$U_- = \alpha\beta(U_+ - U_-) = K_0(U_+ - U_-) \quad \Rightarrow \quad U_- = K_0(U_+ - U_-) \quad \Rightarrow$$

$$U_- = \frac{K_0}{1 + K_0} U_+ \quad \Rightarrow \quad U_+ - U_- = \frac{1}{1 + K_0} U_+ \quad \Rightarrow$$

$$U_+ - U_- = \frac{1}{1 + K_0} U_{вх}.$$

Здесь $U_+ - U_-$ — неотслеженная часть входного возмущения $U_{вх}$ системы стабилизации.

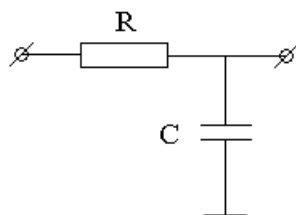
Относительная часть неотслеженного напряжения:

$$\varepsilon \equiv \frac{U_+ - U_-}{U_{вх}} = \frac{1}{1 + K_0}.$$

Тогда

$1 + K_0$ — коэффициент стабилизации системы с обратной связью.

Коэффициент передачи K_0 может быть комплексной величиной. Так, например, коэффициент передачи RC -цепочки:



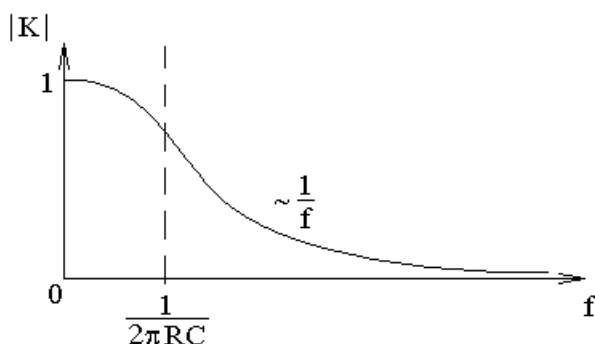
$$K = \frac{1}{R + \frac{1}{i\omega C}} = \frac{1}{1 + i\omega RC}.$$

Здесь $\omega = 2\pi f$, где f — частота изменения напряжения.

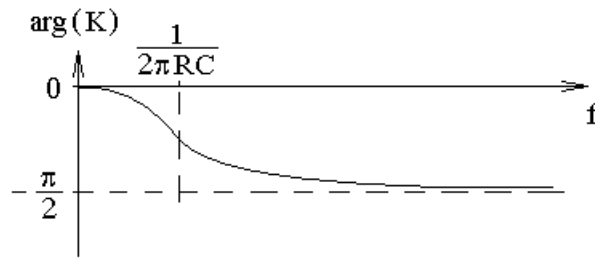
Комплексный коэффициент передачи можно записать, как комплексное число в экспоненциальной форме:

$$K = |K| \cdot e^{i \cdot \arg(K)}.$$

Зависимость комплексного коэффициента передачи от частоты обычно представляют двумя соответствующими зависимостями: амплитудно-частотной характеристикой или зависимостью $|K|$ от f и фазово-частотной характеристикой или зависимостью $\arg(K)$ от f . Для RC -цепочки эти зависимости имеют следующий вид:



и



Здесь $|\arg(K)|$ — это запаздывание по фазе напряжения на выходе схемы относительно напряжения на входе. Запаздывание, так как $\arg(K) < 0$.

Напряжение на выходе любой схемы не может появиться раньше, чем появится напряжение на ее входе. Это условие накладывает некоторое интегральное соотношение между амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристиками любой системы. Интегральное соотношение приводит к тому, что любой спад амплитудно-частотной характеристики вида $\sim \frac{1}{f}$ неизбежно приводит к отставанию по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Каждый спад вида $\sim \frac{1}{f}$ приводит к дополнительному отставанию по фазе $\frac{\pi}{2}$.

Возбуждение или генерация системы с обратной связью.

В любой системе с отрицательной обратной связью на высоких частотах образуется неконтролируемый спад амплитудно-частотной характеристики. На каких-то частотах начинается спад вида $\sim \frac{1}{f}$, на более высоких частотах спад $\sim \frac{1}{f^2}$, затем $\sim \frac{1}{f^3}$ и так далее. Соответственно за этими частотами происходит отставание по фазе на $\frac{\pi}{2}$, $2\frac{\pi}{2}$, $3\frac{\pi}{2}$ и так далее.

Фазовый сдвиг равный π означает, что отрицательная обратная связь на этой частоте оказывается положительной.

Если в выражении для относительной неотслеженной части напряжения

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + K_0}$$

положительный коэффициент передачи петли обратной связи K_0 заменить на отрицательный, что и соответствует фазовому сдвигу на π , то окажется, что относительная неотслеженная часть больше единицы $\varepsilon > 1$ при условии, что $|K_0| < 1$. Если же на этой частоте модуль коэффициента передачи петли обратной связи $|K_0|$ меньше единицы и стремиться к единице, то $\varepsilon \rightarrow \infty$. Бесконечная неотслеженная часть означает возбуждение или генерацию в петле обратной связи.

Возбуждение в петле обратной связи происходит в том и только в том случае, если на частоте фазового сдвига петли равного π модуль коэффициента передачи петли больше или равен единице.

Частоту, на которой фазовый сдвиг равен π , будем называть частотой генерации f_2 . Если $|K_0| > 1$ на так называемой частоте генерации $f = f_2$, то амплитуда синусоиды на частоте генерации f_2 возрастает во времени от случайного шумового значения до тех пор, пока синусоида не начнет ограничиваться напряжениями питания схемы. Ограничение приведет к уменьшению модуля коэффициента передачи, и амплитуда стабилизируется по величине при условии $|K_0| = 1$ на частоте генерации f_2 .

Чтобы избежать возбуждения системы стабилизации нужно обеспечить неравенство $|K_0| < 1$ на частоте $f = f_2$, на которой фазовый сдвиг в петле обратной связи равен π .

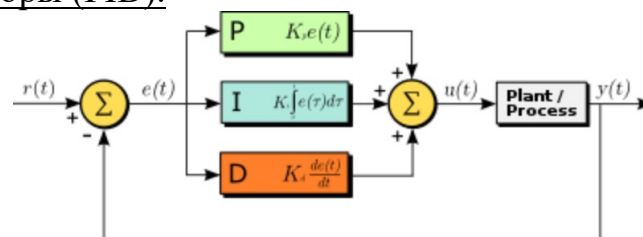
С этой целью внутри микросхемы ОУ организуют принудительный спад амплитудно-частотной характеристики, начиная с очень низких частот. Создают спад вида $\sim \frac{1}{f}$, которому соответствует фазовый сдвиг $\frac{\pi}{2}$. На

частотах, на которых появляется неконтролируемый фазовый сдвиг еще $\frac{\pi}{2}$, коэффициент передачи петли обратной связи оказывается уже достаточно мал, чтобы система обратной связи не возбуждалась.

Так если неконтролируемые повороты фазы появляются на частоте 1 МГц, и на нулевой частоте модуль коэффициента передачи петли обратной связи равен 10^6 , то спад амплитудно-частотной характеристики вида $\sim \frac{1}{f}$

должен начинаться с частоты примерно 1 Гц.

ПИД-регуляторы (PID).



Arturo Urquiza, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

Если напряжение на выходе схемы имеет спад амплитудно-частотной характеристики вида $\sim \frac{1}{f}$, то эта схема интегрирует входной сигнал. Если к выходу сигнала интегрирующей схемы добавить сигнал пропорциональный входному, то спад $\sim \frac{1}{f}$ на выходе схемы с некоторой частоты прекратиться. Если эта частота совпадает с частотой, на которой появляется

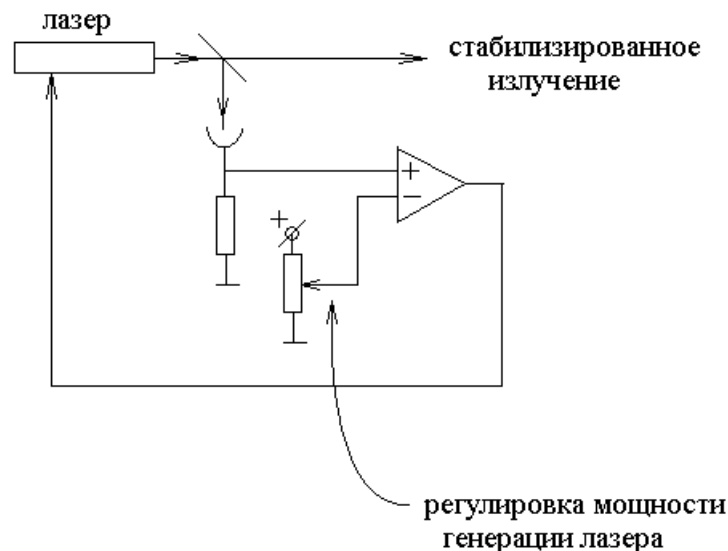
неконтролируемый второй спад $\sim \frac{1}{f}$ петли обратной связи, то до частоты появления третьего спада $\sim \frac{1}{f}$ система обратной связи будет иметь один спад $\sim \frac{1}{f}$. Это позволит увеличить коэффициент стабилизации и быстродействие системы с обратной связью.

Аналогично действует и добавка к сигналу на выходе схемы усиления сигнала пропорционального производной от сигнала на входе.

Сумма интеграла от входного сигнала, входного сигнала и производной от входного сигнала с разными весовыми множителями и является основой усилителя ПИД-регулятора.

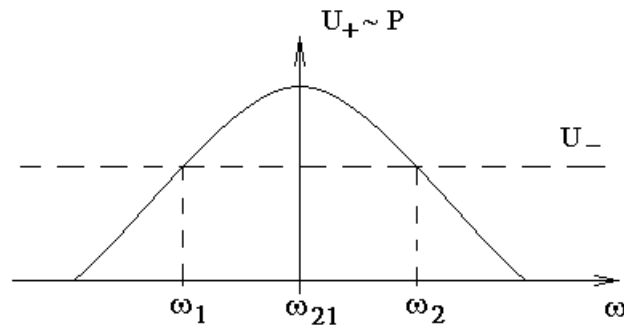
Стабилизация частоты генерации лазера по его мощности.

Рассмотрим следующую принципиальную схему стабилизации частоты генерации лазера:



Здесь напряжение с выхода дифференциального усилителя подается на пьезокерамику, на которой укреплено одно из зеркал лазера, для управления частотой генерации лазера. Разность напряжений $U_+ - U_-$ на двух входах дифференциального усилителя является сигналом ошибки системы стабилизации. То есть система стабилизации удерживает мощность генерации лазера на таком уровне, чтобы $U_+ - U_- = 0$.

Напряжение на плюс-входе усилителя U_+ пропорционально мощности генерации лазера P . Пусть лазер работает в одночастотном режиме генерации, тогда зависимость мощности генерации от частоты примерно повторяет зависимость коэффициента усиления лазерной среды от частоты. Только ось абсцисс этой зависимости приподнята до уровня потерь резонатора лазера. Мощность генерации, как функция частоты, имеет следующий вид:



Здесь ω_{21} — частота центра линии усиления лазерной среды, горизонтальная пунктирная линия на уровне U_- соответствует величине напряжения, которое с потенциометра подается на минус-вход дифференциального усилителя.

Нулевой сигнал ошибки системы стабилизации $U_+ - U_- = 0$ соответствует двум частотам генерации лазера, обозначенным на рисунке, как ω_1 и ω_2 . Одна из этих частот является частотой устойчивого равновесия системы стабилизации, а другая — частотой неустойчивого равновесия.

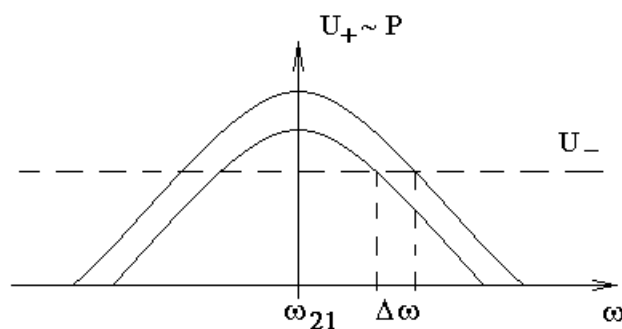
Будем для определенности считать, что крепление зеркала на пьезокерамике устроено таким образом, что при увеличении напряжения на пьезокерамике частота генерации лазера возрастает.

Тогда ω_2 — частота устойчивого равновесия системы стабилизации. И действительно. Пусть в начальный момент времени система стабилизации находится в состоянии равновесия $U_+ - U_- = 0$. И пусть частота генерации лазера по случайным причинам испытала небольшое шумовое изменение в сторону увеличения частоты вправо по оси частот. Тогда в соответствии с зависимостью мощности от частоты мощность генерации лазера уменьшилась. Уменьшение мощности привело к уменьшению напряжения с приемника излучения и уменьшению напряжения U_+ на плюс-входе дифференциального усилителя. Уменьшение значения U_+ привело к уменьшению напряжения на выходе усилителя и к уменьшению напряжения на пьезокерамике. В соответствии с нашим предположением уменьшение напряжения на пьезокерамике приводит к уменьшению частоты генерации лазера.

Итак, шумовое увеличение частоты генерации приводит к тому, что система стабилизации вырабатывает сигнал, который уменьшает частоту генерации. Это и означает, что ω_2 — частота устойчивого равновесия системы стабилизации.

Преимущество предложенного метода стабилизации состоит в том, что стабилизированную частоту генерации можно перестраивать, изменяя величину напряжения U_- , подаваемого на минус вход дифференциального усилителя.

Недостаток такого метода — изменение частоты генерации при изменении усиления лазерной среды, что видно из нижеследующего рисунка:



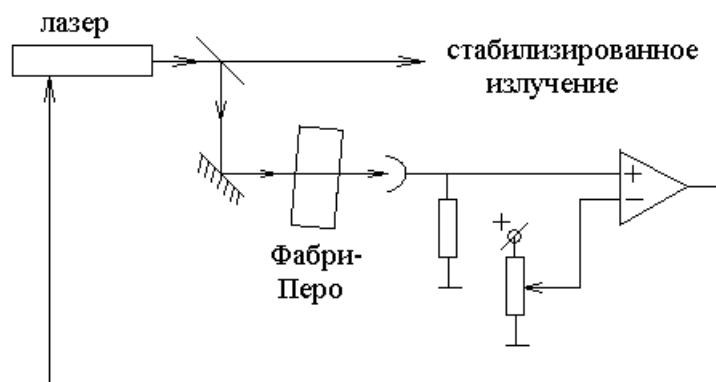
Здесь $\Delta\omega$ — изменение стабилизированной частоты генерации лазера при изменении усиления среды.

Строго говоря, в рассмотренной схеме стабилизируется не частота генерации лазера, а мощность генерации.

Стабилизация частоты генерации лазера по частоте пропускания интерферометра Фабри — Перо.

Простейший интерферометр Фабри — Перо — это прозрачная плоскопараллельная пластинка, на параллельные грани которой нанесены многослойные диэлектрические зеркальные покрытия.

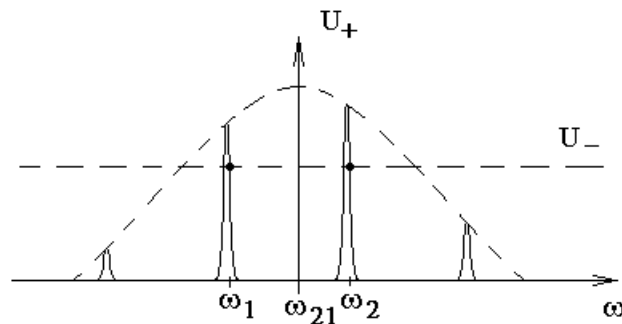
Принципиальная схема стабилизации частоты генерации лазера по частоте пропускания интерферометра Фабри — Перо представлена ниже:



Рассмотрим на одном графике две зависимости от частоты. Зависимость мощности генерации лазера и зависимость коэффициента пропускания интерферометра Фабри — Перо.



Мощность света на приемнике и пропорциональная ей величина напряжения на плюс-входе дифференциального усилителя ведут себя, как произведение представленных выше двух функций:

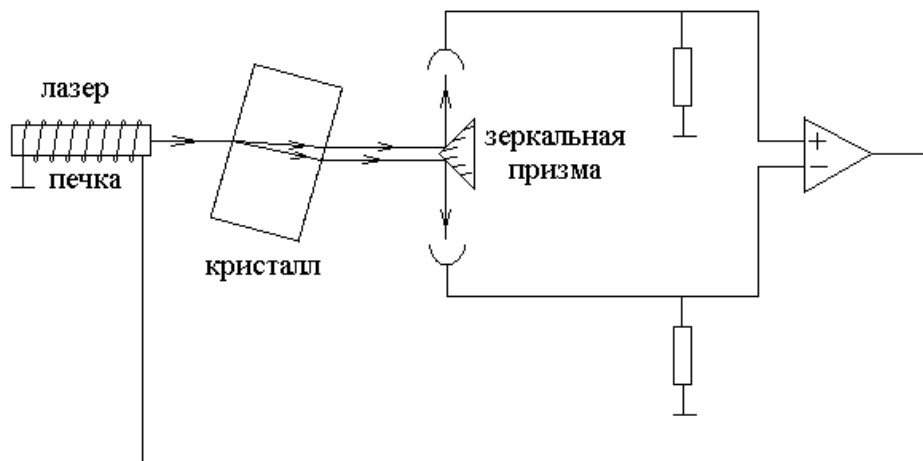


Здесь ω_1 и ω_2 — возможные стабилизированные частоты генерации, для которых сигнал ошибки равен нулю $U_+ - U_- = 0$, и эти положения равновесия системы стабилизации устойчивы, если частота лазера возрастает с увеличением напряжения на пьезокерамике с лазерным зеркалом.

Из рисунка видно, что при изменении усиления лазерной среды частота генерации лазера не может измениться сильнее, чем на половину ширины пика пропускания интерферометра Фабри — Перо. В этом и состоит преимущество данной схемы стабилизации частоты генерации лазера.

Стабилизация частоты генерации лазера в двухмодовом режиме.

В продаже представлен He-Ne лазер, стабилизированный по этой схеме:



Используемый в этой схеме лазер не имеет брюстеровских окон. Зеркала лазера приклеены к разрядной трубке. В таком случае управлять длиной резонатора и частотой генерации лазера с помощью пьезокерамики не удастся. Для управления частотой генерации вокруг разрядной трубки лазера намотана нихромовая спираль — электрическая печка. Печка при нагревании изменяет температуру разрядной трубки и через температурный коэффициент расширения стекла разрядной трубки изменяет ее длину.

На длине резонатора укладывается целое число полуволен $L = m \frac{\lambda}{2}$. Только

в этом случае волна, проходя резонатор в обоих направлениях, наступает себе на хвост в той же фазе, то есть оказывается в фазе сама с собой. Изменение длины резонатора изменяет длину волны излучения. С изменением длины волны изменяется частота излучения лазера.

Напряжение питания на эту печку подается с выхода дифференциального усилителя. На два входа усилителя подаются напряжения с двух приемников излучения.

Излучение лазера без брюстеровских окон содержит две линейные поляризации ортогональные друг другу. Излучение этих двух поляризаций разносится пространственно в результате двулучепреломления при прохождении лазерного луча через плоскопараллельную кристаллическую пластинку. Разнесенные пространственно лучи отражаются зеркальной призмой на два приемника излучения.

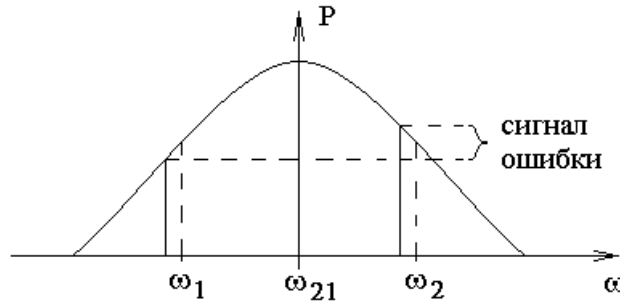
Длина резонатора лазера подобрана таким образом, что в пределах контура линии усиления среды возможна генерация на двух продольных модах, $\frac{c}{2L}$ — разность частот соседних продольных мод лазера.

При симметричной настройке частот этих мод относительно центра линии усиления лазерной среды две моды усиливаются одними и теми же молекулами с лучевыми скоростями $\omega \mp kV_z = \omega_{21}$, откуда $V_z = \pm \frac{\Delta\omega}{k}$, где $\Delta\omega$ — отстройка каждой из мод относительно центра линии усиления. Волны двух мод, бегущие по резонатору лазера слева направо, усиливаются разными молекулами. Мода с большей частотой усиливается молекулами $V_z = +\frac{\Delta\omega}{k}$, а мода с меньшей частотой усиливается молекулами $V_z = -\frac{\Delta\omega}{k}$. Для двух волн во встречном направлении, наоборот, $V_z = -\frac{\Delta\omega}{k}$ и $V_z = +\frac{\Delta\omega}{k}$. В результате две моды усиливаются одними и теми же молекулами, то есть отнимают усиление друг от друга или, как говорят, конкурируют.

Конкуренция оказывается слабее, если поляризации двух мод ортогональны друг другу. В этом случае одну моду усиливают молекулы, например, с вертикальным колебанием диполей молекул, а другую моду — с горизонтальным колебанием диполей. Чем меньше конкуренция, тем больше суммарная мощность генерации двух мод. При этом поляризации двух продольных мод лазера автоматически подстраиваются так, чтобы быть ортогональными друг другу.

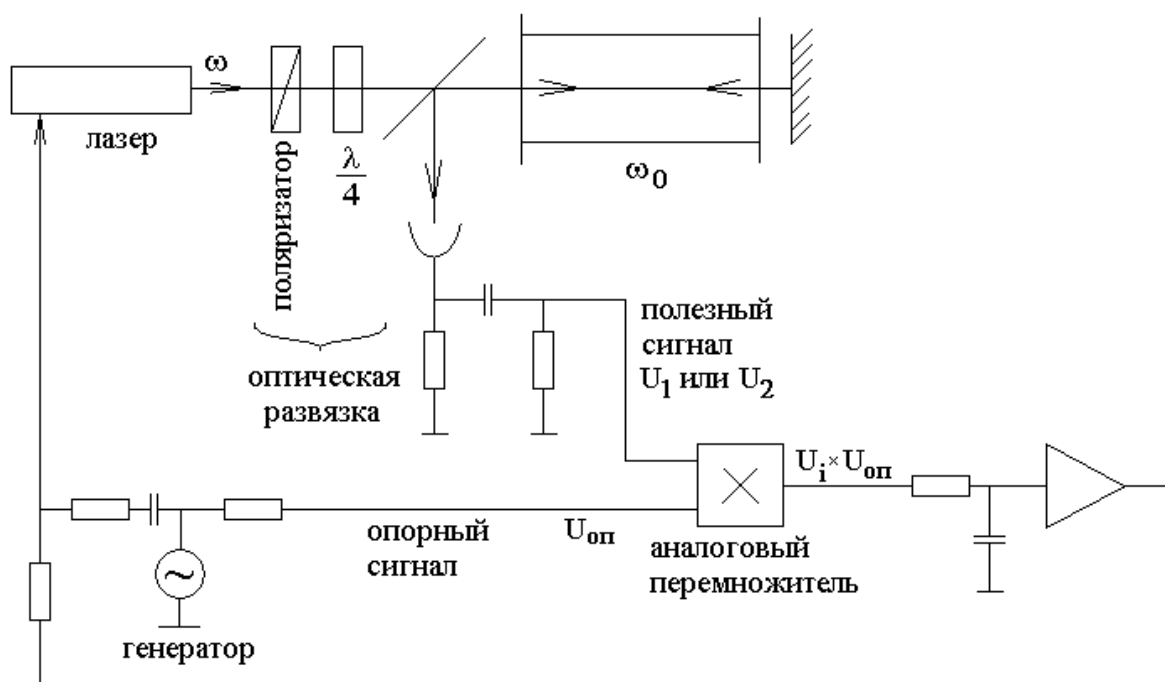
В таком случае два приемника регистрируют не просто свет двух разных поляризаций, но и двух разных продольных мод с разными частотами.

Предположим, что длина резонатора лазера случайно так изменилась, что две продольные моды сместились по частоте относительно симметричной настройки с частотами ω_1 и ω_2 , которые изображены на рисунке вертикальными пунктирными линиями.

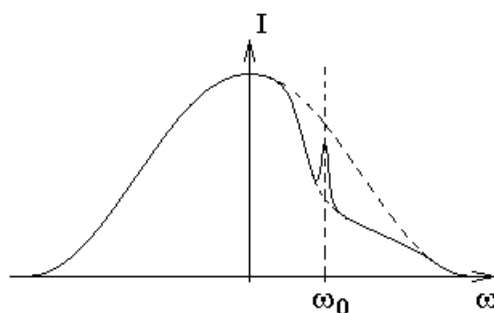


Сплошными вертикальными линиями изображены две продольные моды лазера при некотором изменении длины резонатора. Частотный интервал между продольными модами при этом практически не изменяется. Продольные моды смещаются так, что мощность генерации одной из них уменьшается, а другой — увеличивается. Разность мощностей двух мод и пропорциональная ей разность напряжений с двух приемников $U_+ - U_-$ является сигналом ошибки для рассматриваемой системы стабилизации. Система стабилизации старается изменить длину резонатора лазера так, чтобы мощности двух продольных мод были одинаковыми. При этом система стабилизации удерживает симметричную настройку частот двух продольных мод относительно центра линии усиления лазерной среды. То есть система стабилизации стабилизирует частоты этих двух мод.

Стабилизация лазера по резонансу насыщения поглощения.



В этой схеме зависимость мощности сигнала на приемнике от частоты генерации лазера имеет следующий вид:



Здесь ω_0 — центр линии поглощения газа в кювете, пунктирная часть зависимости — мощность генерации лазера. Вокруг частоты ω_0 в мощности света на приемнике появляется широкий доплеровский провал линии поглощения газа, находящегося в кювете. В центре линии поглощения на частоте ω_0 наблюдается узкий пик резонанса насыщения поглощения.

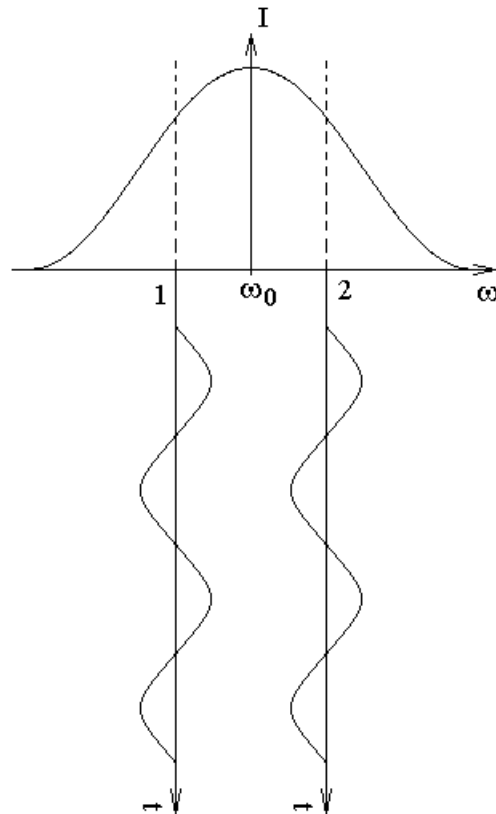
Для формирования сигнала ошибки в данном случае используется синхронное детектирование сигнала на частоте генератора, которое производится на аналоговом перемножителе сигналов.

Опорное напряжение $U_{оп}$ синхронного детектирования подается на нижний вход аналогового перемножителя. На верхний вход перемножителя поступает переменная часть напряжения с приемника лазерного излучения.

Синусоидальное напряжение с генератора подается на пьезокерамику лазера и покачивает частоту лазера с частотой генератора. Этой же синусоидой

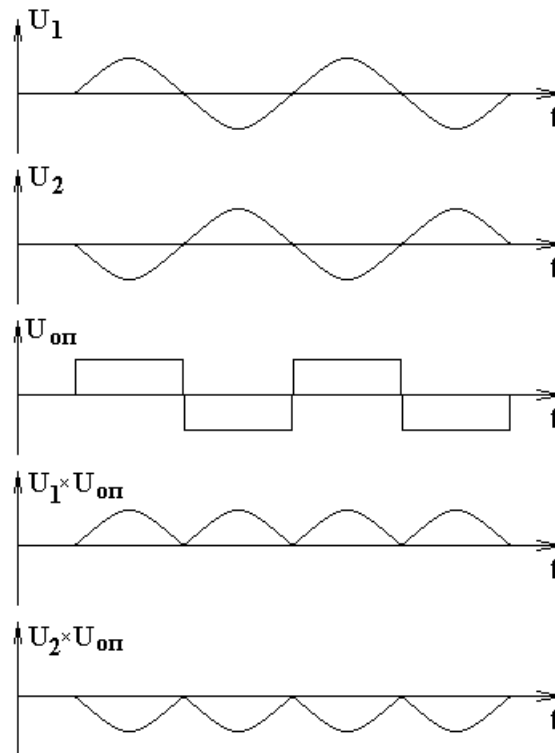
оказывается промодулирована мощность излучения на приемнике света. Фаза синусоиды модуляции зависит от того, на каком склоне резонанса насыщения находится среднее значение частоты лазера.

Для большей наглядности на нижеследующем рисунке резонанс насыщения поглощения растянут по оси частот.



Из рисунка видно следующее. Если средняя частота генерации находится на левом склоне резонанса и качнулась чуть вправо, то мощность на приемнике возросла. Если же средняя частота находится на правом склоне и качнулась чуть вправо, то мощность уменьшилась. То есть на двух склонах резонанса фаза колебаний напряжения с приемника будет противоположной.

На нижеследующем рисунке приведены напряжения на входах и выходах аналогового перемножителя для средней частоты генерации на левом склоне резонанса и на правом склоне. Для простоты рассуждений будем считать, что опорное напряжение на нижнем входе перемножителя имеет форму прямоугольников, а не синусоиды.



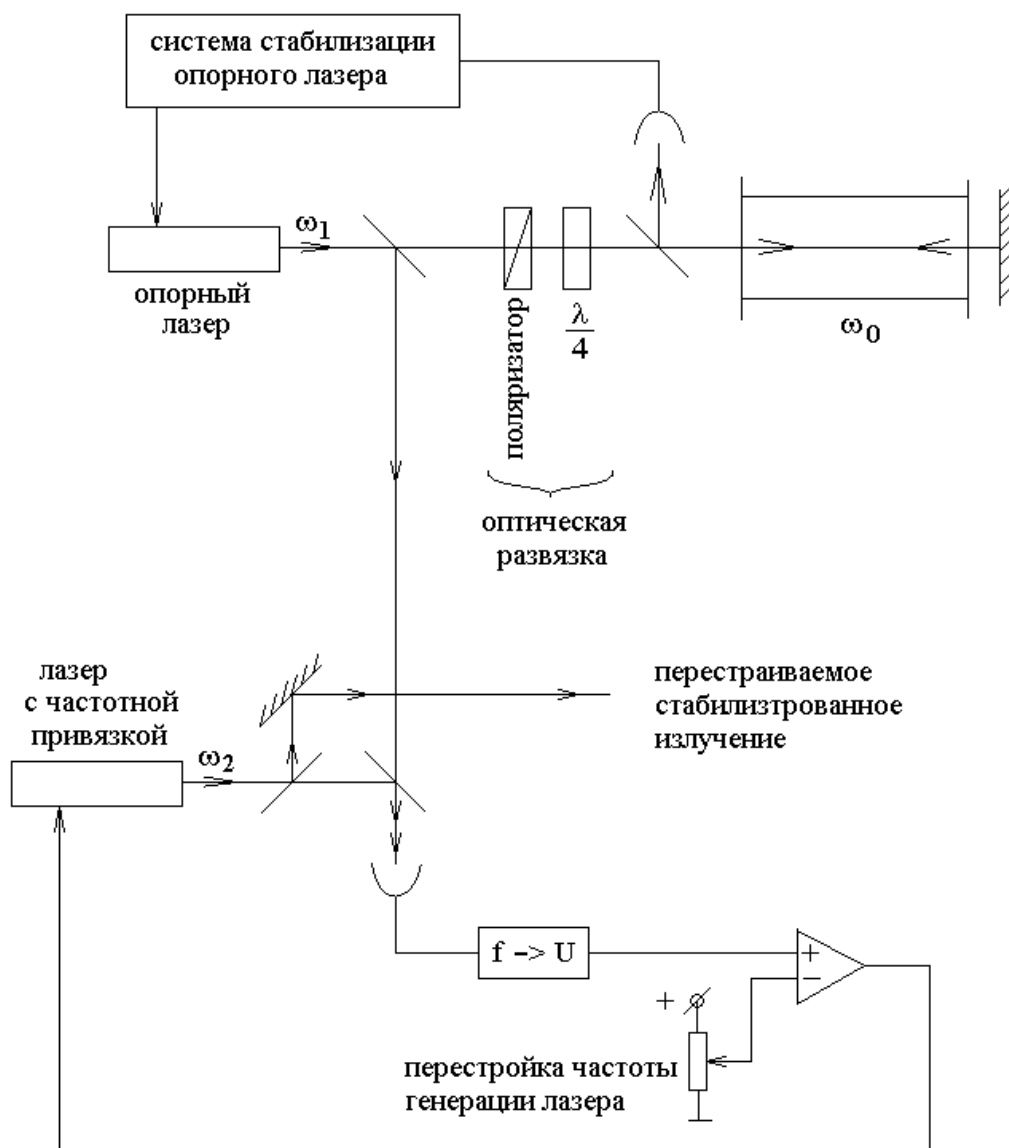
Здесь U_1 и U_2 — напряжения на верхнем входе перемножителя в двух случаях: когда частота генерации лазера находится на левом склоне резонанса насыщения поглощения и когда частота находится на правом склоне; $U_{оп}$ — опорное напряжение синхронного детектора, подаваемое на нижний вход перемножителя; $U_1 \cdot U_{оп}$ — напряжение на выходе перемножителя, если частота генерации лазера находится на левом склоне резонанса насыщения поглощения; $U_2 \cdot U_{оп}$ — напряжение на выходе, если частота на правом склоне.

Сглаженное RC -цепочкой напряжение с выхода перемножителя является сигналом ошибки системы стабилизации. После усиления это напряжение подается на пьезокерамику лазера для управления частотой его генерации. Усилитель может быть инвертирующим или не инвертирующим в зависимости от того, в какую сторону изменяется частота генерации лазера при увеличении напряжения на пьезокерамике. Если частота возрастает, то для получения отрицательной обратной связи усилитель должен быть не инвертирующим.

Система стабилизации стремится удерживать нулевое значение сигнала ошибки, что соответствует стабилизации частоты генерации по нулю первой производной зависимости мощности на приемнике от частоты. Ноль первой производной с хорошей точностью соответствует центру резонанса.

Система частотной привязки одного лазера к другому.

Ниже приведена принципиальная схема экспериментальной установки, позволяющая получить частотно стабилизированное излучение лазера с возможностью медленной перестройки стабилизированного излучения по частоте (сканирования по частоте).



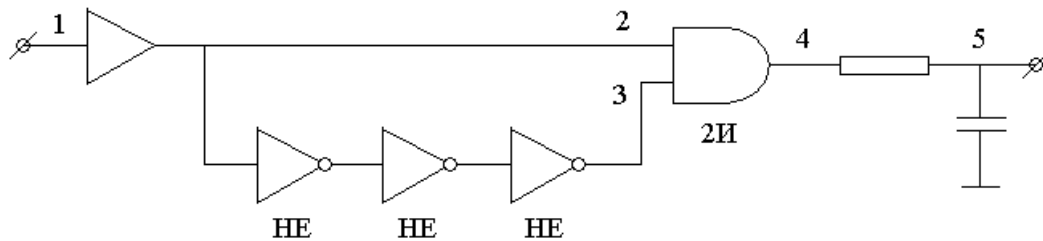
Здесь верхний так называемый опорный лазер стабилизирован по резонансу насыщения поглощения. Вся электронная часть системы стабилизации опорного лазера изображена одним прямоугольником.

Излучение опорного лазера служит частотным репером для стабилизации частоты генерации (частотной привязки) нижнего лазера медленно перестраиваемого по частоте.

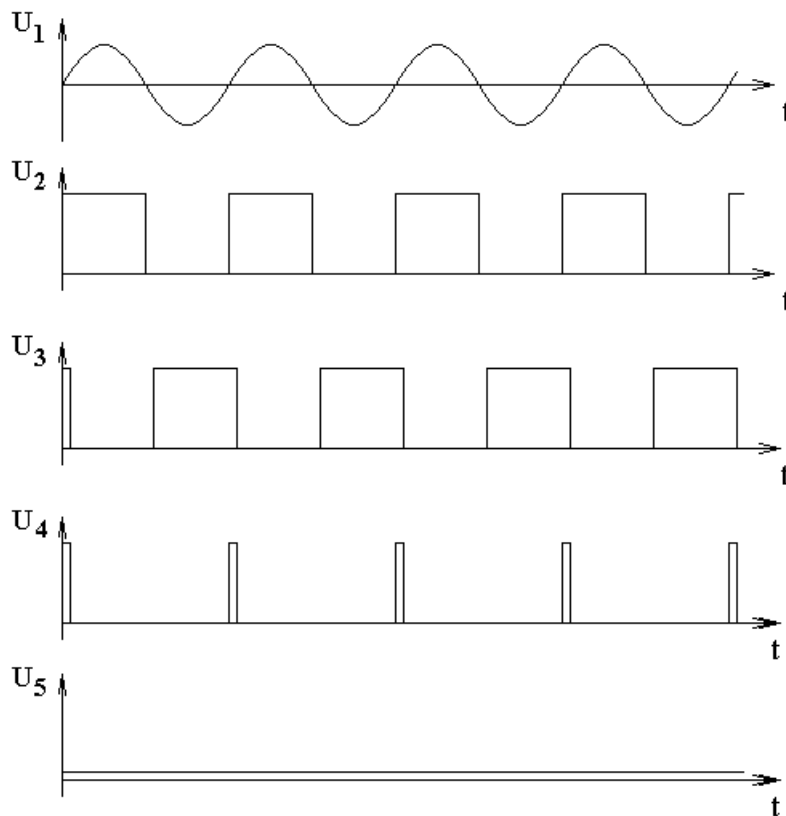
Излучение двух лазеров интерферирует на приемнике, электрическое напряжение с которого представляет собой синусоиду на частоте равной разности частот двух лазеров.

С приемника электрический сигнал поступает на преобразователь частота-напряжение $f \rightarrow U$. Напряжение с выхода преобразователя сравнивается с постоянным напряжением, которое с потенциометра подается на минус-вход дифференциального усилителя. Разность этих напряжений на двух входах дифференциального усилителя является сигналом ошибки системы частотной привязки перестраиваемого лазера. Усиленное напряжение с выхода дифференциального усилителя поступает на пьезокерамику для управления частотой генерации лазера.

Принципиальная схема преобразователя частота-напряжение изображена на нижеследующем рисунке.

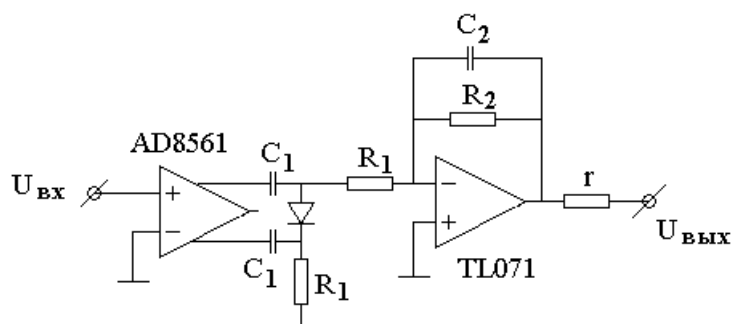


На следующем рисунке приведены напряжения в контрольных точках 1, 2, 3, 4, 5.



Чем больше частота синусоиды в точке 1, тем чаще импульсы в точке 4 и тем больше постоянное напряжение в точке 5.

В моей экспериментальной установке рассмотренная схема не заработала, так как короткие фронты и импульсы создавали заметную наводку на фотосопротивление приемника света. Вместо этого использовалась схема

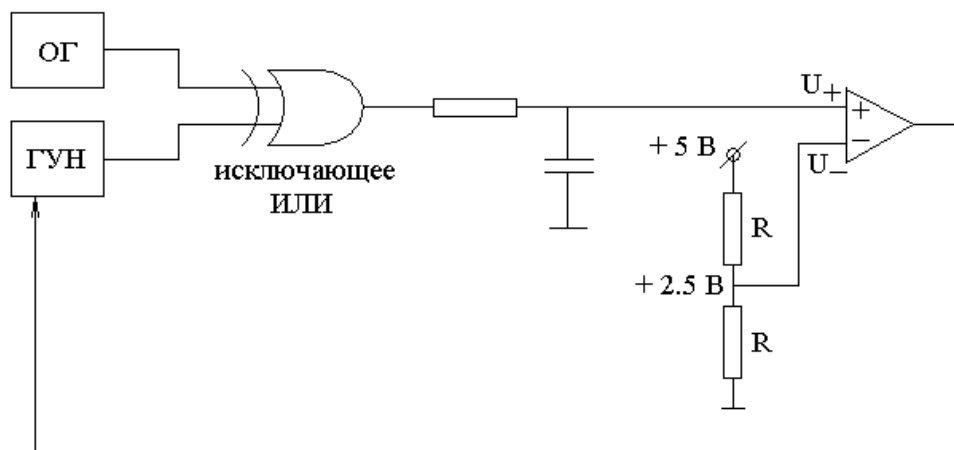


в которой короткие импульсы распространялись на очень малые расстояния (два конденсатора $C_1 = 3\text{ нФ}$ и диод между ними) и служили слабой передающей антенной для наводки; $R_1 = 1\text{ кОм}$.

Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) (PLL — Phase-Locked Loop) генератора управляемого напряжением (ГУН) (VCO — Voltage-Controlled Oscillator).

В современных схемах частотной привязки используется фазовая подстройка частоты биения двух лазеров под частоту некоторого опорного генератора (ОГ). Такая система привязки требует большего быстродействия логических схем, но обеспечивает более высокую степень стабилизации частоты перестраиваемого лазера.

Принципиальная схема фазовой автоподстройки частоты приведена на следующем рисунке, где роль сигнала с приемника биений двух лазеров выполняет сигнал с генератора управляемого напряжением (ГУН):



Здесь подразумевается, что оба генератора генерируют прямоугольное напряжение с логическими уровнями. Для получения такого сигнала частоту биений двух лазеров пропускают через компаратор, который положительное входное напряжение преобразует в логическую единицу, а отрицательную — в логический ноль. Таблица истинности для логических уровней микросхемы **исключающее ИЛИ**:

0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Пусть разность фаз генераторов ОГ и ГУН равна $\delta\varphi$.

Если $\delta\varphi = 0$, то $U_+ = 0\text{ В}$.

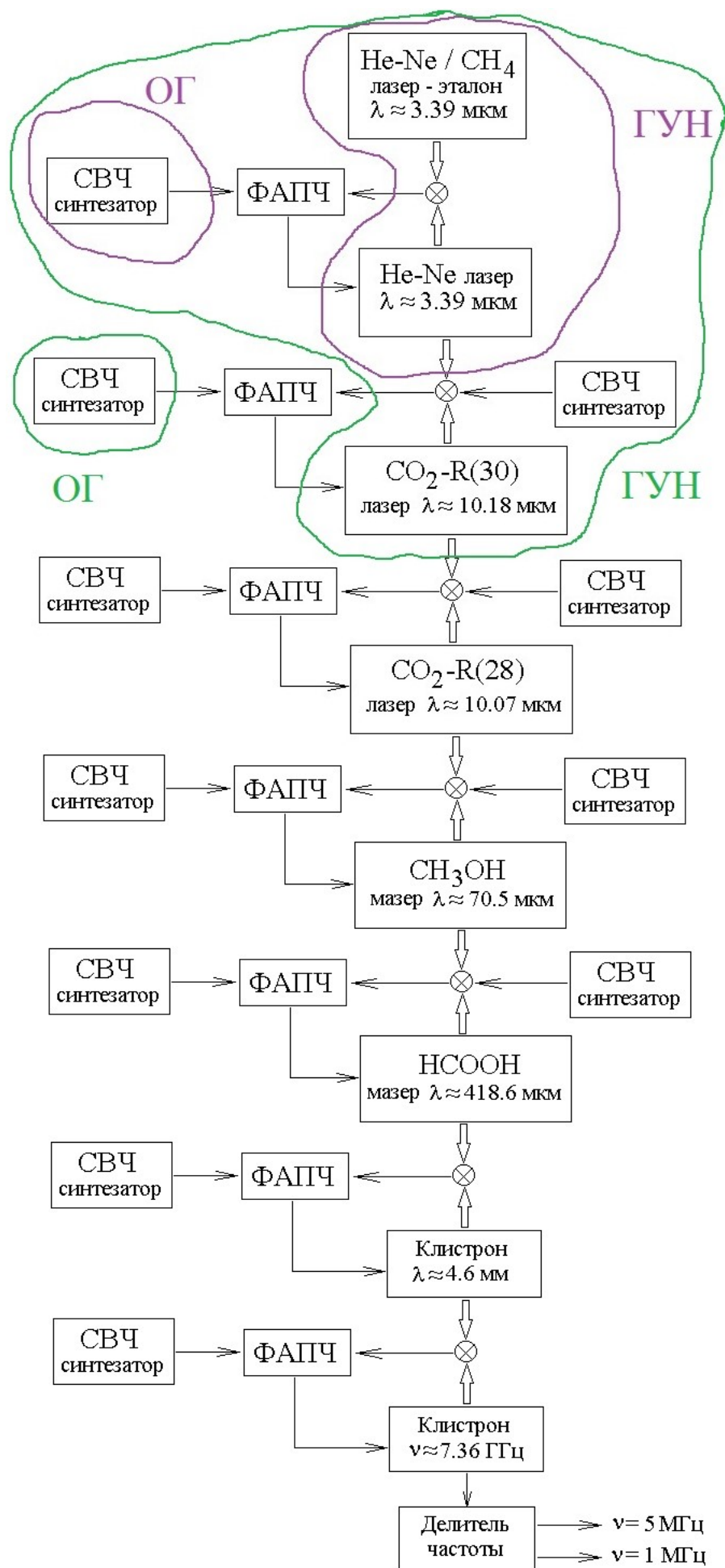
Если $\delta\varphi = \pi$, то $U_+ = 5\text{ В}$.

Если $\delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ или $\delta\varphi = \frac{3\pi}{2}$, то $U_+ = 2.5\text{ В}$.

Одно из этих двух значений — положение устойчивого равновесия системы стабилизации частоты ГУН по частоте ОГ.

Радиооптический мост.

Для сравнения оптической частоты и частоты в радиочастотном диапазоне к 1983 году был разработан так называемый радиооптический мост. Принципиальная схема радиооптического моста приведена на нижеследующем рисунке.

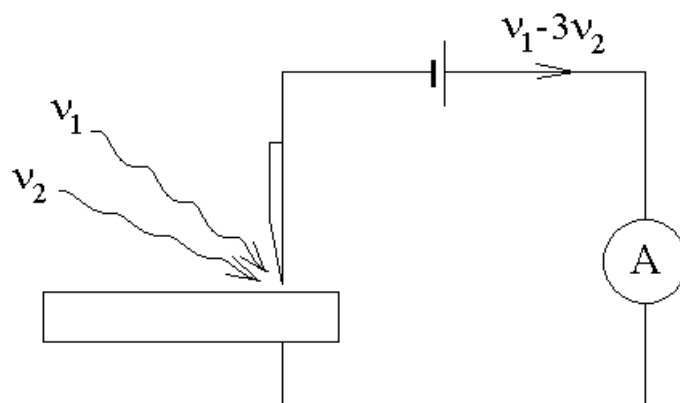


Laser — Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
Maser — Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

88 376 182 599 985 (8) Гц $\approx$ 88 ТГц

P. V. POKASOV, R. HOLZWARTH, TH. UDEM, M. ZIMMERMANN, J. REICHERT, M. NIERING, T. W. HDNSCH, A. K. DMITRIYEV, S. N. BAGAYEV, P. LEMONDE, G. SANTARELLI, P. LAURENT, M. ABGRALL, A. CLAIRON, and C. SALOMON (2002) ABSOLUTE FREQUENCY MEASUREMENTS OF A METHANE-STABILIZED TRANSPORTABLE HE-NE LASER AT 3.39 μ m. Frequency Standards and Metrology: pp. 510-512.

Для сравнения почти кратных частот лазеров используется приемник излучения типа "кошачий ус".



Это приемник, который реагирует на напряженность электрического поля световой волны, а не на интенсивность, как остальные приемники оптического диапазона. Например, в фототоке приемника можно получить сигнал на частоте $\nu_1 - 3\nu_2$, если эта частота достаточно низкая.